



**GRUPO I  
GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA - GGH**

**REPOTENCIAÇÃO DA USINA DE ELEVAÇÃO RACCOON MOUNTAIN (USA)**

**Wagner Luiz Morgante \***

**Thomas Kunz**

**Mauro Ken It Uemori**

**Alstom Suíça**

**Alstom Suíça**

**Alstom Brasil**

**RESUMO**

A Usina de elevação Raccoon Mountain é operada pela proprietária TVA e está localizada em Chattanooga – Tennessee - nos Estados Unidos. Ela é composta por 4 (quatro) unidades moto-geradoras (bombeamento), com uma capacidade total instalada originalmente de 1700 MVA, tendo entrado em operação comercial em 1979.

Devido ao elevado nível de vibrações e más condições dos equipamentos decidiu-se pela execução de uma intervenção relativamente abrangente, incluindo-se turbinas e moto-geradores.

Este artigo descreve as soluções propostas para os problemas dos moto-geradores, as modificações implementadas e os resultados obtidos ao final dos trabalhos.

**PALAVRAS-CHAVE**

Repotenciação, Reforma, Moto-gerador, Vibração,

**1.0 - INTRODUÇÃO**

O principal objetivo da intervenção nos moto-geradores foi a eliminação das vibrações excessivas advindas da turbina. Concomitantemente a potência nominal dos moto-geradores deveria ser aumentada de 425MVA para 476MVA, enquanto que a máxima potência contínua passaria a ser de 490MVA.

Fazia parte do contrato, também, um aumento da eficiência do moto-gerador, a ser alcançada através da aplicação de novas tecnologias de projeto e dimensionamento assim como utilização de novos materiais.

A TABELA 1 ilustra as características dos moto-geradores após a execução dos trabalhos:

**TABELA 1: Características técnicas dos moto-geradores**

Potência nominal	MVA	476
Potência máxima contínua	MVA	490
Tensão nominal	kV	23
Rotação nominal	rpm	300
Número de polos	-	24
Frequência da rede	Hz	60

\*Zentralstrasse, 40 - Birr - CEP 5242 - Suíça

Tel.: +41 XX 56 466 5109 - Fax: +41 XX 56 466 6095 - e-mail: wagner.l.morgante@power.alstom.com

## 2.0 - PROPOSTAS E SOLUÇÕES IMPLEMENTADAS

Feito o levantamento dos dados disponíveis e as análises necessárias, as seguintes soluções foram propostas e implementadas de maneira a eliminar os problemas e atender aos demais requisitos contratuais:

- Fornecimento de uma nova carcaça do estator, empregando elementos oblíquos especialmente projetados para os casos de reformas onde existam limitações no espaço disponível,
- Novo núcleo do estator sem dutos de ventilação, refrigerado a água circulando através de tubos localizados no diâmetro externo do estator. Pelo conceito original o núcleo era refrigerado a ar que passava através de dutos radiais de ventilação,
- Enrolamento estatórico completo utilizando o sistema Micadur® de isolamento (VPI), sendo as barras também refrigeradas a água. Os condutores ocios localizados nas barras passaram a ser de aço inoxidável ao invés de cobre, material utilizado na máquina original,
- Alteração do circuito de ar do sistema de ventilação, incluindo-se defletores de ar. Esta modificação é uma consequência da alteração do sistema de refrigeração do núcleo do estator,
- Cabeçote para entrada/saída da água de refrigeração do rotor.

Além disso os resfriadores do sistema de refrigeração da água assim como o sistema de controle foram substituídos, aumentando-se sua capacidade de resfriamento.

A implementação das modificações citadas resultam no acréscimo da capacidade de troca térmica do sistema fechado de resfriamento de água.

### 2.1 Estator com elementos oblíquos

Com o desenvolvimento e introdução dos elementos oblíquos há mais de duas décadas, a ALSTOM iniciou uma nova era relativa a projeto de hidrogeradores de grande porte com destacado desempenho mecânico. Mais de 120 (cento e vinte) geradores com elementos oblíquos estão em operação atualmente em praticamente todos os países ao redor do mundo, incluindo-se todos os geradores da Usina Hidrelétrica de Itaipú e os geradores de fornecimento ALSTOM da Usina de Três Gargantas, na China.

A adoção de elementos oblíquos representou uma revolução com a superação das limitações de projetos dos hidrogeradores resultantes de esforços mecânicos e térmicos, não apenas no estator mas também no rotor e nas fundações, sendo que alguns dos benefícios obtidos são:

- Redução da solicitação mecânica em seus componentes,
- Melhoria na uniformidade do entreferro em todas as condições de operação,
- Redução das tensões e reações nas fundações devido a curto-circuito bifásico e erro de sincronização.

Os elementos oblíquos do estator são utilizados tanto para conectar o estator à fundação quanto à cruzeta superior, aumentando significativamente a capacidade da carcaça de absorção das deformações térmicas além de resultar numa elasticidade adequada para minimizar os impactos das cargas dinâmicas a que o estator é submetido durante operação.

O elevado padrão em termos de concentricidade e circularidade do estator e do rotor resultante da aplicação de elementos oblíquos nos hidrogeradores ALSTOM é demonstrado com sucesso nas dezoito unidades geradoras da Usina Hidrelétrica de Itaipú, que estão em operação há praticamente duas décadas e que recentemente atingiram um recorde histórico em termos de disponibilidade de equipamento.

#### 2.1.1 Carcaça do estator com elementos oblíquos

As carcaças de estatores que empregam elementos oblíquos preenchem os principais requisitos relacionados a hidrogeradores de grande porte:

- Permite uma expansão térmica radial praticamente livre do estator, prevenindo a ocorrência de flambagem do núcleo do estator. Por outro lado a conexão com a fundação é rígida o suficiente na direção tangencial de maneira a transferir os torques provenientes do entreferro para as fundações.
- Através do dimensionamento adequado dos elementos oblíquos, com a variação do ângulo e de suas dimensões, o comportamento dinâmico torcional pode ser modificado de maneira a ajustar-se a frequência natural torcional do estator. Esta frequência natural é ajustada para valores abaixo da frequência de excitação devido a curto-circuito e erro de sincronização, resultando em menores esforços nas fundações no caso de ocorrência de um destes eventos.
- Garante circularidade e concentricidade adequadas ao estator.

A FIGURA 1 é uma comparação entre o torque transmitido à fundação através do estator utilizando elementos oblíquos (frequência natural 12.5 Hz neste caso) e um estator convencional (frequência natural típica de 42 Hz). No exemplo ilustrado a frequência de excitação provém de um curto-circuito bifásico, sendo que a frequência da rede é 50 Hz.

Facilmente se verifica que, embora o torque aplicado no entreferro seja o mesmo nos dois casos (representados pelas linhas vermelhas), o torque transmitido para as fundações no caso de uma carcaça com elementos oblíquos é muito menor que aquele transmitido pela carcaça convencional.

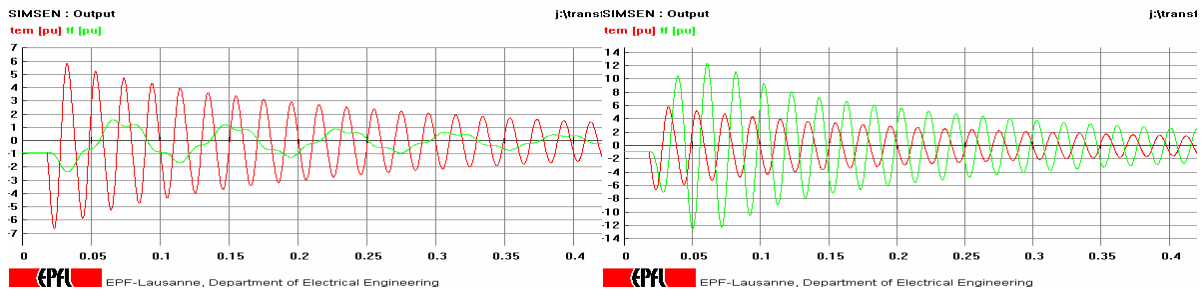


FIGURA 1: Gráficos comparativos entre carcaça com elementos oblíquos e convencional

### 2.1.2 Elementos oblíquos aplicados ao estator de Raccoon Mountain

Antes do projeto de Raccoon Mountain os elementos oblíquos eram empregados apenas em geradores novos, uma vez que o espaço necessário no poço do gerador dificultava a aplicação desta solução para reformas e repotenciações de geradores.

Para o caso de Raccoon Mountain a engenharia da ALSTOM desenvolveu, baseada nas dezenas de experiências com geradores em operação, um novo conceito de projeto para a aplicação de elementos oblíquos. A **FIGURA 2** ilustra o *design* especialmente desenvolvido para Raccoon Mountain e que passou a ser utilizado como padrão para casos similares.

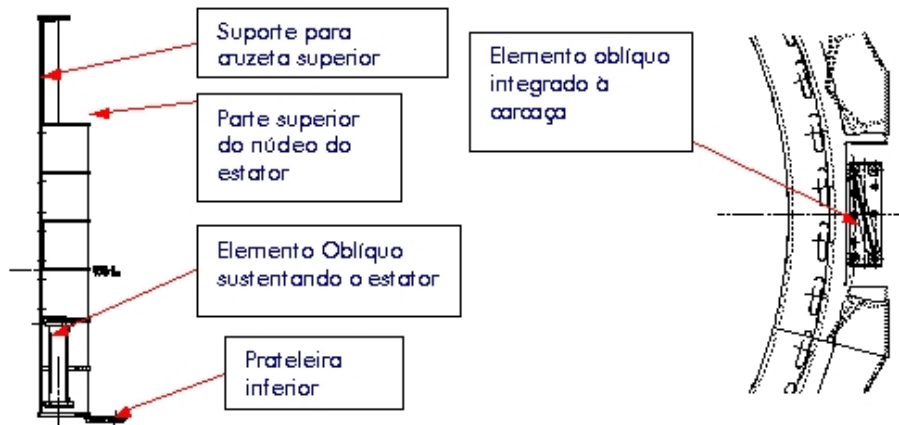


FIGURA 2: Carcaça com elementos oblíquos para aplicação em reformas

Conforme mencionado, o desenvolvimento desta solução viabilizaria a aplicação de elementos oblíquos também em casos de reformas onde o espaço disponível é limitado devido ao uso de carcaças convencionais, tornando possível a obtenção dos benefícios intrínsecos deste *design*, ou seja, a garantia de concentricidade, circularidade e a frequência natural do estator controlada, sem a necessidade de maiores intervenções nas fundações.

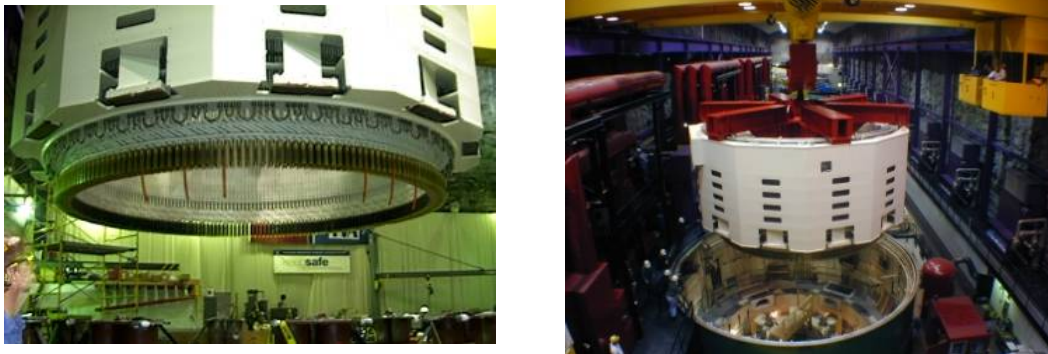
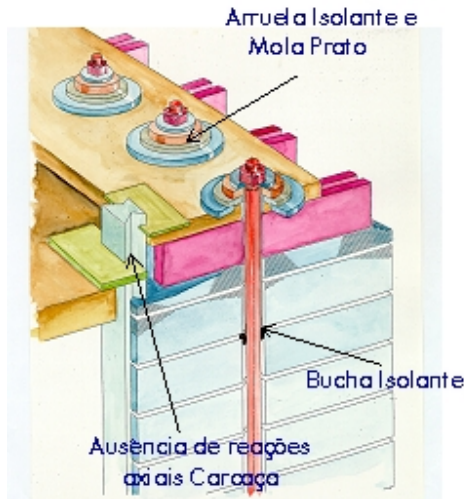


FIGURA 3: Estator de Raccoon Mountain com elementos oblíquos

## 2.2 Novo núcleo do estator

Além da eliminação dos dutos de ventilação do núcleo do estator, o sistema de prensagem também foi alterado. Os antigos tirantes de prensagem, localizados entre a carcaça e o diâmetro externo do núcleo, foram substituídos por novos tirantes que o atravessam, conforme ilustrado na FIGURA 4.



Este sistema de prensagem, utilizado praticamente em todos os geradores fornecidos nos últimos anos pela ALSTOM, não representa risco adicional algum para a máquina, especialmente por estar completamente isolado eletricamente, o que elimina a possível presença de correntes elétricas nos tirantes.

Esta solução permite uma melhor distribuição de pressão no núcleo e, por não estar suportado na carcaça, possibilita um aumento na pressão média no chapeamento sem a necessidade de reforço na carcaça, aumentando ainda mais a segurança relativa à flambagem do núcleo.

Além disso o sistema de molas instalado em uma das extremidades dos tirantes garante a manutenção da pressão média entre as chapas, eliminando a necessidade de re-aperto dos tirantes do núcleo praticamente durante toda a vida útil da máquina, reduzindo-se significativamente os custos com manutenção.

No caso de Raccoon Mountain foram utilizadas chapas de aço silicioso com perdas específicas de 2.5W/kg a 1.5 Tesla a 50 Hz.

FIGURA 4: Sistema de prensagem do núcleo do estator

## 2.3 Modificação no sistema de refrigeração

Normalmente em geradores de grande porte com baixa rotação e potências elevadas, a refrigeração do enrolamento estatórico é feita pela circulação de água pelo interior das barras do estator, enquanto que as demais partes ativas como núcleo do estator e bobina polar são refrigeradas a ar.

Já nos casos de máquinas de alta potência e alta rotação a decisão na escolha do sistema de refrigeração a ser empregado pode ser tomada tendo-se por base a potência aparente por polo. De acordo com a experiência da ALSTOM, quando a potência aparente por polo estiver na faixa dos 30MVA, aspectos como limitações físicas na casa de força, vida útil da máquina, eficiência etc, devem ser levados em consideração na avaliação sobre uma possível aplicação da refrigeração a água para o enrolamento estatórico e rotórico (as demais perdas devem ser removidas por ventilação axial em circuito fechado de ar).

Embora no caso de Raccoon Mountain a potência por polo seja de 20.7MVA à máxima potência contínua, foi tomada a decisão pela manutenção do sistema de refrigeração total a água (a máquina original já utilizava este sistema de refrigeração) dada a freqüente mudança de cargas, por operar como motor e gerador alternadamente.

Com isso as diferentes expansões das várias partes da máquina podem ser mantidas em níveis mínimos, sendo que as faixas de temperatura entre operação e máquina fria, assim como as temperaturas médias de operação, serão consideravelmente menores. O conjunto de todos estes elementos resulta em uma maior vida útil do equipamento mesmo em se tratando de condições extremas de operação.

### 2.3.1 Geradores completamente refrigerados a água

Máquinas empregando este tipo de refrigeração têm uma longa tradição no campo de geradores síncronos de alta rotação. No início dos anos 60 a ALSTOM (então BBC) colocou em operação comercial o primeiro gerador totalmente refrigerado a água. Tratava-se de um gerador da hidrelétrica "Bavona", localizada na Suíça, com uma potência de 86MVA e rotação de 428.6 rpm. A TABELA 2 mostra um resumo do desenvolvimento da ALSTOM no campo de geradores síncronos de alta velocidade totalmente refrigerados a água ao longo dos anos.

TABELA 2 – Geradores ALSTOM refrigerados a água

Usina	Potência MVA	Sn/2p MVA	Ano	Observação
BAVONA (CH)	86	6.1	1963	
TONSTAD (N)	190	11.9	1965	
AURLAND (N)	250	15.6	1971	
SILZ (A)	352	29.3	1977	*
(GUANGZHOU I)	333	27.8	1990	**
SY SIMA (N)	360	18.0	1978	
SVARTISEN (N)	420	23.3	1992	
BIEUDRON (CH)	500	35.7	1998	

\*) juntamente com outro fabricante

\*\*) Parcialmente refrigerado a ar

Foi verificada a ocorrência de alguns pequenos problemas nos projetos iniciais, problemas estes relacionados a vazamento nas câmaras de água e entupimentos dos condutores ôcos das barras do estator, que por serem fabricados em cobre apresentaram deposição de sujeira nas superfícies internas devido à reações químicas da água com o cobre. Além disso a rigidez da conexão entre a câmara de água, os condutores ôcos e as barras estatóricas não estava otimizada.

Para eliminar os riscos de vazamentos devido à vibrações assim como os entupimentos, a ALSTOM desenvolveu um novo conceito para a câmara de água e alterou o material dos condutores ôcos de cobre para aço inoxidável.

A FIGURA 5 mostra um corte transversal de uma barra estatórica utilizando condutores ôcos de aço inoxidável e a mesma barra com a câmara de água já instalada, também fabricada em aço inoxidável e soldada à barra.

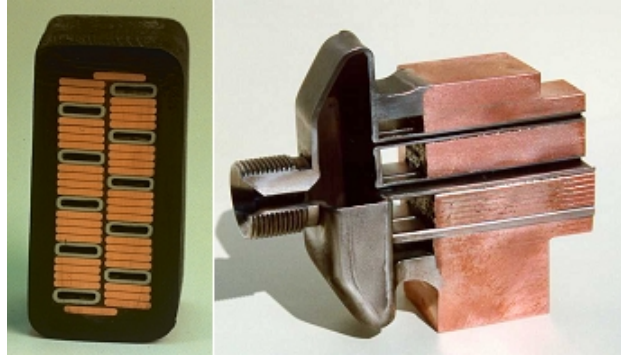


FIGURA 5: Barra atualmente empregada para refrigeração do enrolamento a água

Esta foi a solução adotada para os oito geradores de fornecimento ALSTOM para a primeira fase da Usina Hidrelétrica de Três Gargantas, na China, com potência nominal de 777.8 MVA e que tem demonstrado corresponder totalmente às expectativas, tanto da ALSTOM quanto do cliente (até o momento em que este artigo foi escrito estavam em operação 6 geradores, sendo que o primeiro havia entrado em operação comercial há aproximadamente dois anos).

### 2.3.2 A solução implementada em Raccoon Mountain

Conforme mencionado anteriormente, tanto o enrolamento do estator como o do rotor (bobinas polares) dos motores desta usina foram originalmente fornecidos com refrigeração a água, enquanto que o ar passando através do núcleo do estator (por dutos de ventilação) refrigerava esta parte do equipamento.

Seguindo-se a filosofia ALSTOM para geradores totalmente refrigerados a água, o sistema de refrigeração do núcleo do estator também foi alterado, removendo-se os dutos de ventilação (o que o torna uma estrutura compacta), enquanto que tubos para a água de refrigeração foram instalados em fendas semi-circulares localizadas na circunferência externa do núcleo.

A compactação foi feita por meio de tirantes que passam através do núcleo, propiciando uma distribuição de pressão uniforme em todas as áreas.

A FIGURA 6 ilustra a montagem do núcleo do estator de Raccoon Mountain em uma de suas prensagens intermediárias. Nela é possível verificar-se o posicionamento dos tirantes de prensagem assim como as fendas semi-circulares onde, posteriormente, serão instalados os tubos para a água de refrigeração do núcleo.



FIGURA 6: Prensagem intermediária do núcleo do estator

## 2.4 Novo enrolamento estático

O enrolamento estático é totalmente refrigerado a água, que circula pelo interior de condutores ocos fabricados em aço inoxidável e que fazem parte da barra. Por sua vez a barra é conectada ao sistema de circulação e refrigeração de água através de câmaras de aço inoxidável soldadas em suas extremidades (ver FIGURA 5).

Formado por duas camadas de barras Roebel, cujo isolamento principal é feito a base de fibra de vidro e mica impregnada com resina epoxi, o enrolamento foi dimensionado para uma tensão nominal de 23 kV. As barras são impregnadas a vácuo (VPI – Vacuum Pressure Impregnation) através do sistema Micadur®, cuja excelente qualidade tem sido comprovada ao longo dos últimos 40 anos pelas máquinas em operação que utilizaram este sistema de isolamento. Cada barra é testada nos laboratórios da ALSTOM antes de ser enviada à obra ou instalada, sendo que a tensão de teste pode variar de três a quatro vezes a tensão normal de operação.

As barras estáticas são inseridas nas ranhuras do núcleo do estator envolvidas em uma fita semi condutiva e uma massa, de maneira a acomodar possíveis irregularidades no chapeamento, aderindo perfeitamente às suas paredes, proporcionando excelente desempenho elétrico e mecânico sob todas as condições de operação. Este sistema desenvolvido na ALSTOM e conhecido como *round-packing* é ilustrado na FIGURA 7, que mostra também o sistema de fechamento de ranhura, que emprega molas onduladas tipo *ripple spring*.

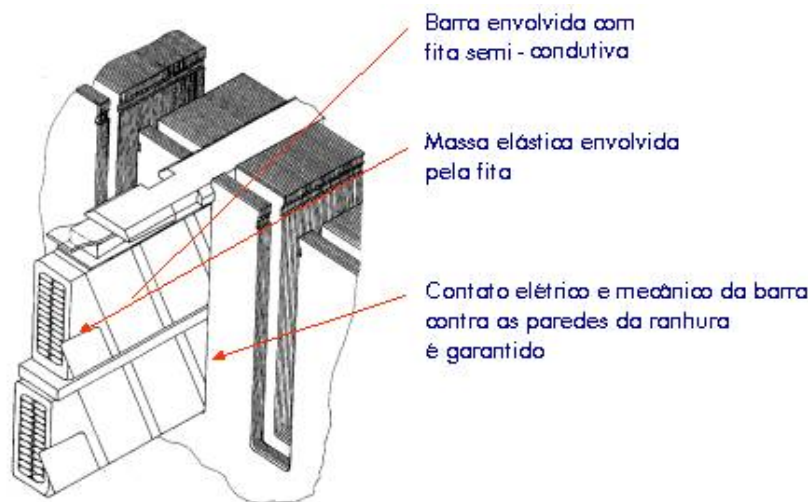


FIGURA 7

### Sistema *Round-packing* para fixação lateral das barras nas ranhuras do núcleo do estator

## 3.0 - MONTAGEM / COMISSIONAMENTO

Devido às grandes dimensões da máquina a montagem do estator foi executada na própria usina. Para tanto, os seguintes elementos foram transportados:

- Nova carcaça, dividida em três segmentos e soldada na obra,
- Chapas do núcleo do estator e seus demais componentes,
- Barras estáticas,
- Mangueiras para circuito de água de refrigeração,
- Demais peças e equipamentos necessários para completar a montagem do estator na obra.

Os trabalhos foram feitos em uma área específica dentro da usina, tendo sido possível a montagem completa do estator antes de colocá-lo no poço.

Durante a fase final da montagem iniciou-se a desmontagem do gerador existente e os reparos necessários no poço, assim como as devidas alterações no sistema de circulação e resfriamento da água de refrigeração do gerador. Em paralelo as bobinas dos polos foram limpas com a utilização de produtos químicos adequados.

A sequência de montagem do estator completo foi a seguinte:

- Soldagem dos segmentos da carcaça,
- Chapeamento e prensagem do núcleo do estator / Teste de indução
- Instalação e teste da primeira camada de barras estáticas,
- Instalação e teste da segunda camada de barras estáticas,
- Brazagem das conexões do enrolamento,
- Descida do estator no poço,

- Instalação e teste das conexões hidráulicas do sistema de refrigeração do enrolamento (ver FIGURA 8),
- Instalação das capas das conexões do enrolamento (ainda não instaladas na FIGURA 8).

Finalmente foi executado o teste de alta tensão no enrolamento completo, que no caso de Raccoon Mountain foi de 47 kV ( $2 \times U_n + 1$  kV durante 1 minuto).



FIGURA 8: Estator completo, incluindo conexões hidráulicas

A TABELA 3 é um comparativo dos principais valores medidos durante a fase de comissionamento e os valores calculados durante a fase de projeto do moto-gerador.

TABELA 3: Comparação entre valores calculados e medidos

		Calculados	Medidos
Corrente de excitação em vazio $I_{fo}$	A	2241	2200
Corrente de excitação em curto circuito $I_{fk}$	A	2813	2790
Reatância síncrona $X_{di}$	p.u.	1.31	1.37
Relação de curto-circuito $K_c$	p.u.	0.83	0.80
Temperatura máxima do enrolamento estatórico <sup>1)</sup>	°C	70	64
Temperatura média do enrolamento rotórico <sup>1)</sup>	°C	72	42.8
Elevação da temperatura da água pura de refrigeração do estator <sup>1)</sup>	K	32	27
Elevação da temperatura da água pura de refrigeração do rotor <sup>1)</sup>	K	38	22

<sup>1)</sup> operando a 460 MVA, 23.1 kV,  $I_f=3650$  A

#### 4.0 - CONCLUSÕES

Os valores obtidos durante o comissionamento estavam de acordo com os resultados dos cálculos efetuados durante a fase de projeto e dentro dos limites estabelecidos contratualmente com o cliente. As diferenças obtidas nas temperaturas encontradas no estator e no rotor explicam-se pelo fato da temperatura da água de refrigeração estar em torno de 11°C, sendo que os cálculos foram feitos de acordo com a especificação técnica do cliente que especificava temperatura máxima da água de refrigeração como 32°C.

A reforma/repotenciação da Usina Raccoon Mountain pode ser considerada como um sucesso, especialmente quando se considera que o tempo de parada para as outras unidades foi significativamente reduzido.

Conceitos de projeto relativamente simples e amplamente comprovados foram aplicados de maneira a se obter estabilidade e alto grau de confiabilidade nas máquinas renovadas. O conceito de elementos oblíquos aplicado pela ALSTOM foi utilizado para suportar o estator enquanto que o moto-gerador passou a ser totalmente refrigerado a água, reduzindo-se consideravelmente o nível de tensões mecânicas de maneira geral, o que é de particular interesse quando se trata de moto-geradores, os quais estão submetidos a variações freqüentes de carga.

## 5.0 - REFERÊNCIAS

- [1] H. Vögele, J. Schwanda, M. Starcevic: The Hydro Generators at the Itaipu Power Plant, Conference on the Evolution and modern aspects of Synchronous Machines, Proceedings Part 1, SM100, August 1991, Zurich
- [2] W. Kellenberger, The optimum angle for the support of vertical hydro-generators with skew arms or skew leaf springs, Brown Boveri Rev. 67, 1980 (2), p. 108-116
- [3] D. Schafer, The concept of oblique elements and its application to two world record hydro generators, Hydrovision 1998, Reno, conference proceedings
- [4] D. Schafer & M. Förster: Refurbishment of the Motor-Generators at Raccoon Mountain Pump Storage Plant; Hydro 2000, Berne; conference proceedings

## 6.0 - AUTORES

**Wagner Luiz Morgante** graduou-se em engenharia mecânica pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo em 1988. Em 1989 ingressou na ABB do Brasil, onde passou por áreas como Cálculo Mecânico e Coordenação Técnica de Projetos, estando sempre envolvido com hidrogeradores. Atualmente trabalha no Centro de Tecnologia de Hidrogeradores, na Suíça, gerenciando um time formado por diversas nacionalidades e sendo responsável pela definição do *design* a ser empregado nos geradores ALSTOM, além de ter ativa participação na transferência de tecnologia para Unidades como China, Canadá, França e Índia.

**Thomas Kunz**, suíço, graduou-se em engenharia elétrica em 1991, quando então entrou para a Divisão de hidrogeradores da ABB Suíça. Especialista em projetos elétricos e ventilação, gerenciou o grupo responsável pela definição elétrica dos hidrogeradores ALSTOM e atualmente é o diretor do Centro de Tecnologia de Hidrogeradores.

**Mauro Ken Iti Uemori** graduou-se em engenharia elétrica pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo em 1978. Em 1979 ingressou na ABB do Brasil na área de Cálculo Elétrico e Orçamento de Geradores. Atualmente trabalha na Alstom Brasil gerenciando uma equipe de Cálculo Elétrico de Geradores, Ante projeto de componentes elétricos, hidromecânicos e levantamento, Orçamento de Geradores , Turbinas, Hidromecânicos e Levantamento.